

CLIPPEDIMAGE= JP02002039178A

PAT-NO: JP02002039178A

DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 2002039178 A

TITLE: MAGNETIC BEARING DEVICE

PUBN-DATE: February 6, 2002

INVENTOR- INFORMATION:

NAME	COUNTRY
SHINOZAKI, HIROYUKI	N/A

ASSIGNEE- INFORMATION:

NAME	COUNTRY
EBARA CORP	N/A

APPL-NO: JP2000227608

APPL-DATE: July 27, 2000

INT-CL (IPC): F16C032/04

ABSTRACT:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a magnetic bearing device capable of producing effects similar to those created by a magnetic flux feedback type power amplifier within a controller without the need to provide a magnetic flux sensor near an electromagnet, and without causing an increase in number of signal lines within a cable.

SOLUTION: The controlling magnetic bearing device, in which a supported body is levitated and supported by a magnetic force, includes a current sensor 11 for detecting a control current output by a power amplifier 7, and a displacement sensor 10 for detecting the displacement of the supported body 1. A control current detection signal  $S_1$  of the current sensor 11 and a displacement

detection signal  $S_g$  of the displacement sensor 10 are input to the power amplifier 7 which passes a control current  $i$  through a solenoid coil 6, and an estimator 20 is provided for estimating, in response to the input signals, magnetic flux or magnetic flux density produced between the support side surface of an electromagnet 4 and the side of an electromagnet target 3 facing the body 1. A value estimated by the estimator 20 is fed back to the power amplifier 7.

COPYRIGHT: (C) 2002, JPO



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 磁気力を発生する支持体側の電磁石を具備し、該支持体側の電磁石のコイルにパワーアンプより制御電流を通電することにより発生する磁気力で被支持体を浮上支持する制御形の磁気軸受装置において、前記パワーアンプの出力制御電流を検出する電流センサ及び前記被支持体の変位を検出する変位センサとを具備し、前記支持体側電磁石のコイルに制御電流を通電するパワーアンプに、少なくとも前記電流センサの制御電流検出信号と前記変位センサの変位検出信号を入力信号とし、該入力信号を受け、前記支持体側の電磁石面と前記被支持体側の電磁石ターゲット間に発生する磁束又は磁束密度を推定する磁束又は磁束密度推定手段を設け、該磁束又は磁束密度推定手段の推定値を前記パワーアンプにフィードバックすることを特徴とする磁気軸受装置。

【請求項2】 請求項1に記載の磁気軸受装置において、前記電流センサの制御電流検出信号を前記パワーアンプにフィードバックすることを特徴とする磁気軸受装置。

【請求項3】 請求項1に記載の磁気軸受装置において、前記支持体側の電磁石のコイル電圧を検出する電圧センサを設け、該電圧センサのコイル電圧検出信号を前記パワーアンプにフィードバックすることを特徴とする磁気軸受装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は被支持体を磁気力で浮上支持する磁気軸受装置に関し、特に高速回転機械（例えば、ターボ分子ポンプ、遠心圧縮機等）、低速回転ではあるが被支持体を非接触で支持することをメリットとした半導体デバイス製造装置用の回転機器、ガス循環ファン等に好適な磁気軸受装置に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】制御形磁気軸受は、変位センサによって、被支持体との相対変位を検出し、所定の制御則によって、制御電流を演算し、その演算結果に基づき電磁石コイルに通電し電磁石を駆動するパワーアンプを備える構成である。このパワーアンプの負荷特性は、負荷が電磁石コイルであることから、遅れ特性であることは容易に推測できる。この遅れ特性的ため、周波数が高くなるほど、パワーアンプ入力信号に対する制御電流との関係に大きな遅れが発生する。

【0003】このような遅れ特性を改善するには、局部的なフィードバック補償を施すことは古くからしばしば行なわれ、従来3つの手法が知られている。一つは、電磁石コイル電流を検出し、パワーアンプ入力にフィードバックする方法（これを「電流フィードバック形パワーアンプ」と呼ぶ）。2つ目は電磁石コイルに印加するコ

イル電圧を検出し、パワーアンプ入力にフィードバックする方法（これを「電圧フィードバック形パワーアンプ」と呼ぶ）。3つ目は、電磁石と被支持体のターゲット間に発生する磁束を検出し、同じくパワーアンプ入力にフィードバックする方法（これを「磁束フィードバック形パワーアンプ」と呼ぶ）。

【0004】図1は電流フィードバック形パワーアンプを採用した磁気軸受の構成例を示す図である。図1では1軸分を抜き出して示している。図1において、1は被支持体であり、該被支持体1には、センサターゲット2と電磁石ターゲット3が設けられている。支持体（図示せず）側にはこのセンサターゲット2、電磁石ターゲット3のそれぞれに対応して変位センサ10、電磁石4が設けられている。変位センサ10は変位センサアンプ9に接続され、変位センサ10とセンサターゲット2の間のギャップ長さgを示す変位検出信号Sgを出力する。

【0005】この変位検出信号Sgと目標指令信号eoとにより、被支持体1の目標浮上位置が与えられる。この目標浮上位置に非接触で浮上位置決めするための制御則が補償器8にあり、補償器8の出力が制御指令信号S1となる。この制御指令信号S1をパワーアンプ7に入力し、制御指令信号S1に追従した制御電流iを電磁石4の電磁石コイル6に通電する。この時、電磁石4はコイル負荷=遅れ負荷であるため、入力信号に追従できない。この遅れ特性を改善するため、電磁石コイル6の制御電流iを電流センサ11で検出し、局部的フィードバックを行なっている。即ち、電流センサ11で検出した制御電流検出信号Siを調整器12を介してパワーアンプ7の入力にフィードバック（負帰還）させている。

【0006】図2は電圧フィードバック形パワーアンプを採用した磁気軸受の構成例を示す図である。同図において、図1と同一符号を付した部分は同一又は相当部分を示す。なお、他の図面においても同様とする。本磁気軸受は電磁石4の電磁石コイル6に印加されるコイル電圧を検出する電圧センサ13を設け、該電圧センサ13で検出した検出電圧信号Svを調整器12を介してパワーアンプ7の入力にフィードバック（負帰還）させている。これにより、図1の磁気軸受と同様、遅れ負荷特性の改善をしている。

【0007】図3は磁束フィードバック形パワーアンプを採用した磁気軸受の構成例を示す図である。本磁気軸受は、電磁石4の電磁石ヨーク5の電磁石ターゲット3の対向面に磁束μを検出するホール素子等の磁束センサ14を設け、該磁束センサ14の検出磁束信号Sμを調整器12を介してパワーアンプ7の入力に負帰還させている。この磁束フィードバック形パワーアンプ方式は、電磁石コイル6のコイル負荷に加え、電磁石4の電磁石ヨーク5、電磁石ターゲット3を構成する磁性材料の特性による電磁石コイル6に通電する制御電流iと発生磁束μの伝達特性をも考慮して、改善しようとするもので

40  
40  
50

ある。例えば、日本機械学会論文集（第一部）36巻284号（昭和45-4）P. 578に開示されているような効果が知られている。

【0008】現在、工業的に多く実施されているものは、電流フィードバック形パワーアンプを採用した磁気軸受である。これは電磁石コイルのコイル電流は磁気軸受内の安全性確保のために必要な検出パラメータであり、コントローラ内でフィードバック系が閉じるなどのやり易さから、多く採用されている。しかしながら、電磁石コイル電流とそれによって発生するはずの磁束が、電磁石ヨークや電磁石ターゲットの磁気的、電気的特性（ヒステリシス損、渦電流損）の影響によって遅れ特性をもつことがあり、電流フィードバック形パワーアンプではこれを改善できないという問題がある。

【0009】上記のように、高速回転機械、低速回転であるが被支持体を非接触で支持することをメリットとした半導体デバイス製造装置用回転機器、ガス循環ファン等の特殊環境下で用いる特殊環境用磁気軸受では、電磁石ヨーク、電磁石ターゲットをソリッドな構造とする必要があり、パワーアンプ入力指令信号と実際に発生する磁束との遅れ現象が重大な問題となっている。また、より制御性能の高い磁気軸受の実現に対してもこの遅れ特性の改善の必要がある。

【0010】磁気軸受の性能という点からは、図3に示す構成の磁束フィードバック形パワーアンプを用いればよいのであるが、磁束センサを新たに設ける必要があること、この磁束センサはコントローラ内ではなく、長いケーブルで繋がれた磁気軸受の電磁石近傍に設ける必要があるため、新たにケーブル内の信号線が増えるという問題がある。仮に真空雰囲気中に用いる磁気軸受では、信号線をハーメチックシールしたコネクタを介して大気側に引き出す必要がある。このためコネクタピン数はできるだけ少ないほうが好ましいが、ケーブル内の信号線数が増えるということはこの要請に反することになる。また、磁束センサに薄型のホール素子を用いると壊れ易いという問題、二次コイル施工のスペースがない等の問題がある。

#### 【0011】

【発明が解決しようとする課題】本発明は上述の点に鑑みてなされたもので、電磁石近傍に磁束センサを設ける必要がなく、ケーブル内の信号線の本数を増加させることがなく、コントローラ内で磁束フィードバック形パワーアンプと同等な効果が実現できる磁気軸受装置を提供することを目的とする。

#### 【0012】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するため請求項1に記載の発明は、磁気力を発生する支持体側の電磁石を具備し、該支持体側の電磁石のコイルにパワーアンプより制御電流を通電することにより発生する磁気力で被支持体を浮上支持する制御形の磁気軸受装置にお

いて、パワーアンプの出力制御電流を検出する電流センサ及び被支持体の変位を検出する変位センサとを具備し、支持体側電磁石のコイルに制御電流を通電するパワーアンプに、少なくとも電流センサの制御電流検出信号と変位センサの変位検出信号を入力信号とし、該入力信号を受け支持体側の電磁石面と被支持体側の電磁石ターゲット間に発生する磁束又は磁束密度を推定する磁束又は磁束密度推定手段を設け、該磁束又は磁束密度推定手段の推定値をパワーアンプにフィードバックすることを特徴とする。

【0013】上記のように、磁束又は磁束密度推定手段を設け、電流センサの制御電流検出信号と変位センサの変位検出信号から、支持体側の電磁石面と被支持体側の電磁石ターゲット間に発生する磁束又は磁束密度を推定し、この推定値をパワーアンプにフィードバックするので、磁束フィードバック形パワーアンプと同様、電磁石コイルのコイル負荷に加え、電磁石の電磁石ヨークや電磁石ターゲットを構成する磁性材料の特性による電磁石コイルの制御電流と発生磁束の伝達特性をも考慮した改善が可能であると共に、磁束又は磁束密度推定手段はコントローラ内に設けるので、ケーブル内の信号線の本数を増加させる必要がない。

【0014】請求項2に記載の発明は、請求項1に記載の磁気軸受装置において、電流センサの制御電流検出信号をパワーアンプにフィードバックすることを特徴とする。

【0015】上記のように、電流センサの制御電流検出信号をパワーアンプにフィードバックする、従来の電流フィードバック形パワーアンプ方式を請求項1に記載の磁気軸受装置に負荷することにより、工業的信頼性を向上させることができる。

【0016】請求項3に記載の発明は、請求項1に記載の磁気軸受装置において、支持体側電磁石のコイル電圧を検出する電圧センサを設け、該電圧センサのコイル電圧検出信号をパワーアンプにフィードバックすることを特徴とする。

【0017】上記のように、電圧センサのコイル電圧検出信号をパワーアンプにフィードバックする、従来の電圧フィードバック形パワーアンプ方式を請求項1に記載の磁気軸受装置に負荷することにより、工業的信頼性を向上させることができる。

#### 【0018】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態例を図面に基づいて説明する。図4は本発明に係る磁気軸受装置の構成例を示す図である。本磁気軸受装置は、被支持体1のセンサターゲット2と電磁石ターゲット3のそれぞれに対応して変位センサ10、電磁石4が設けられている。変位センサ10は変位センサアンプ9に接続され、変位センサ10とセンサターゲット2の間のギャップ長さgを示す変位検出信号Sgを出力する。変位検出

信号  $S_g$  と目標指令信号  $e_0$  とにより、被支持体 1 の目標浮上位置が与えられ、補償器 8 から制御指令信号  $S_1$  がパワーアンプ 7 に出力される。

【0019】20は支持体側の電磁石ヨーク 5 の面と被支持体 1 の電磁石ターゲット 3 の間に発生する磁束又は磁束密度を推定する推定器である。該推定器 20 に電流センサ 11 で検出される制御電流検出信号  $S_i$  と変位センサ 10 で検出された変位検出信号  $S_g$  が入力される。

推定器 20 はこの制御電流検出信号  $S_i$  と変位検出信号  $S_g$

$$B = i N / \{ (2g/\mu_0) + (1_m/\mu_0 \mu_{s1}) + (1_n/\mu_0 \mu_{s2}) \} [T] \quad (1)$$

となり、

$$(1_m/\mu_0 \mu_{s1}) + (1_n/\mu_0 \mu_{s2}) \ll (2g/\mu_0) \quad (2)$$

とおける場合には、

$$B \approx (\mu_0 i N) / (2g) [T] \quad (3)$$

と、概算で扱える。

【0021】ここで、N：電磁石コイルの巻数、A：電磁石ヨークの断面積、i：電磁石コイル6の電流、g：電磁石ヨーク端面と電磁石ターゲットの間のギャップ、 $l_m$ ：電磁石ヨーク側の平均磁路長、 $l_n$ ：電磁石ターゲット側の平均磁路長、B：磁束密度、 $\phi$ ：磁束 ( $\phi = B \cdot A$ )、 $\mu_0$ ：真空透磁率（大気でも同じ）、 $\mu_{s1}$ ：電磁石ヨーク側比透磁率、 $\mu_{s2}$ ：電磁石ターゲット側比透磁率、である。

【0022】断面積Aの電磁石ヨーク 5 で、漏れ磁束がない場合があるので、電磁石ヨーク 5 の端面と電磁石ターゲット 3 面の間のギャップ  $g$  での磁束  $\phi$  は、磁束密度 B と断面積 A の積に等しい。式 (1) に磁束密度と他のパラメータとの関係を示す。電磁石ヨーク側比透磁率  $\mu_{s1}$ 、電磁石ターゲット側比透磁率  $\mu_{s2}$  は磁束密度又は磁界の強さ H の大きさ、その変動周波数の変数である。従来はこれらを定数として扱うことで十分である用途が多かった。これが無視できないケースでは図 3 に示す構成の磁気フィードバック形パワーアンプを採用していた。

【0023】図 6 は電磁石のコイル電流と発生する磁束又は磁束密度との一般的な伝達特性を示す図である。ここでは、ゲインを省略し、位相特性を示す。図 6 において、曲線①は電磁石ヨークと電磁石ターゲットに珪素鋼板

$$B = K \cdot (i/g) \cdot f$$

$$\phi = B \cdot A$$

ここで、K はゲイン定数で、電磁石コイル 6 の巻き数や調整ゲインである。f は図 6 に示した方法により、遅れ特性を模擬した模擬器の特性である。従って、少なくとも電磁石コイル 6 のコイル電流 i (電流センサ 11 の制御電流検出信号  $S_i$ ) と、電磁石ヨーク 5 端面と電磁石ターゲット 3 の間のギャップ  $g$  (変位センサ 10 の変位検出信号  $S_g$ ) を入力すると磁束密度 B 相当の信号を得ることができる。また、磁束  $\phi$  と磁束密度 B の関係は式 (5) の関係であるので、ゲイン定数 K に断面積 A を含めれば、磁束  $\phi$  相当の信号を得る。

\*  $S_g$  を入力信号として、電磁石ヨーク 5 の面と電磁石ターゲット 3 の間に発生する磁束  $\phi$  又は磁束密度 B を推定し、この推定値をパワーアンプ 7 の入力に負帰還させている。なお、ゲイン等の調整も推定器 20 に含まれる。

【0020】図 5 は電磁石の磁気回路について説明するための図である。図では、漏れ磁束が無視できるような磁気回路を例としている。図中、点線 L は平均磁路を示す。漏れ磁束が無い場合の磁束密度 B は

$$B = i N / \{ (2g/\mu_0) + (1_m/\mu_0 \mu_{s1}) + (1_n/\mu_0 \mu_{s2}) \} [T] \quad (1)$$

※板の積層構造を使用した場合、曲線②は同じく珪素鋼板の積層構造を用いているが駆動電圧が高い場合（駆動電圧が高いう場合、鉄損が増えるので珪素鋼板の積層構造でも①に比べて位相特性は劣化する）、曲線③は電磁石ヨークと電磁石ターゲットにソリッドな磁性材料を使用した場合を示す。

【0024】図 6 に示すように、コイル電流と発生する磁束又は磁束密度との伝達特性は遅れ特性であり、電磁石ヨークや電磁石ターゲットを構成する磁性材料や構造によって遅れ特性は異なる。特殊用途の磁気軸受の伝達特性は、図 6 の矢印 C に示す方向になり易い。

【0025】電磁石のコイル電流と、磁束  $\phi$ 、磁束密度 B との位相遅れ伝達関数は、よく知られた、図 7 (a)、(b) に示すようなローパスフィルタ等の伝達関数式で表現することができる。また、実際のデータをカーブフィットし、式で得ることもできる。また、簡単なアナログ回路で模擬できる場合もある。なお、図 7 (a) は受動素子を用いたローパスフィルタの構成を示し、図 7 (b) はオペアンプを用いたローパスフィルタの構成を示す。

【0026】図 8 は上記推定器 20 の構成例を示す図である。上記式 (1) や (3) の関係から、

$$(4)$$

$$(5)$$

★【0027】図 4 に示すように、磁束又は磁束密度を推定する推定器 20 を用いることで、磁束  $\phi$  の検出やケーブルの信号線数を増加させることなく、コントローラ内で磁束相当信号を得て、パワーアンプ 7 にフィードバックできる。また、推定器 20 に必要な入力信号は、従来の磁気軸受装置で既に持っている変位センサ 10 の変位検出信号  $S_g$  と電流センサ 11 の制御電流検出信号  $S_i$  である。

【0028】図 9 は本発明に係る磁気軸受装置の構成例を示す図である。本磁気軸受装置が図 4 に示す磁気軸受

装置と異なる点は調整器12を設け電流センサ11で検出した制御電流検出信号S<sub>i</sub>を該調整器12を介してパワーアンプ7にフィードバックしている点である。即ち、本磁気軸受装置は、図1に示す構成の従来の電流フィードバック形パワーアンプに、磁束又は磁束密度を推定する推定器20を併用したものである。

【0029】図10は本発明に係る磁気軸受装置の構成例を示す図である。本磁気軸受装置が図4に示す磁気軸受装置と異なる点は、電磁石コイル6に印加されるコイル電圧を検出する電圧センサ13及び調整器12を設け、該電圧センサ13で検出した検出電圧信号S<sub>v</sub>を調整器12を介してパワーアンプ7にフィードバックしている点である。即ち、本磁気軸受装置は、図2に示す構成の従来の電圧フィードバック形パワーアンプに、磁束又は磁束密度を推定する推定器20を併用したものである。

【0030】図11は一般的な磁気軸受を採用する装置の構成を示す図である。磁気軸受用コントローラ100と被支持体を浮上支持するのに磁気軸受を用いる磁気軸受内蔵回転機械101とは、比較的長い（例えば、約20m）ケーブル102で接続されている。磁気軸受内蔵回転機械101の磁気軸受から、変位センサ10の変位検出信号S<sub>g</sub>、電流センサ11で検出した制御電流検出信号S<sub>i</sub>及び電圧センサ13で検出した検出電圧信号S<sub>v</sub>がケーブル102を介して磁気軸受用コントローラ100に伝送され、磁気軸受用コントローラ100のパワーアンプ7からの制御電流i等がケーブル102を介して磁気軸受内蔵回転機械101に伝送される。

### 【0031】

【発明の効果】以上、説明したように各請求項に記載の発明によれば下記のような優れた効果が得られる。

【0032】請求項1に記載の発明によれば、磁束密度推定手段を設け、電流センサの制御電流検出信号と変位センサの変位検出信号から、支持体側電磁石面と被支持体側電磁石ターゲット間に発生する磁束又は磁束密度を推定し、この推定値をパワーアンプにフィードバックするので、磁束フィードバック形パワーアンプと同様、電磁石コイルのコイル負荷に加え、電磁石の電磁石ヨーク、電磁石ターゲットを構成する磁性材料の特性による電磁石コイルの電流と発生磁束の伝達特性をも考慮した改善が可能であると共に、磁束密度推定手段はコントローラ内に設けるので、ケーブル内の信号線の本数を増加させる必要がない。

【0033】請求項2に記載の発明によれば、電流センサの制御電流検出信号をパワーアンプにフィードバックする、従来の電流フィードバック形パワーアンプ方式を

請求項1に記載の磁気軸受装置に付加することにより、工業的信頼性を向上させることができる。

【0034】請求項3に記載の発明によれば、電圧センサのコイル電圧検出信号をパワーアンプにフィードバックする、従来の電圧フィードバック形パワーアンプ方式を請求項1に記載の磁気軸受装置に付加することにより、工業的信頼性を向上させることができる。

### 【図面の簡単な説明】

【図1】従来の電流フィードバック形パワーアンプを採用した磁気軸受装置の構成例を示す図である。

【図2】従来の電圧フィードバック形パワーアンプを採用した磁気軸受装置の構成例を示す図である。

【図3】従来の磁束フィードバック形パワーアンプを採用した磁気軸受装置の構成例を示す図である。

【図4】本発明に係る磁気軸受装置の構成例を示す図である。

【図5】磁気回路の各パラメータと磁束密度との関係を示す図である。

【図6】コイル電流と発生磁束又は磁束密度との一般的な伝達特性を示す図である。

【図7】図6の遅れ特性を模擬する方法についての説明図である。

【図8】本発明に係る磁気軸受装置に用いる磁束又は磁束密度を推定する推定器の構成例を示す図である。

【図9】本発明に係る磁気軸受装置の構成例を示す図である。

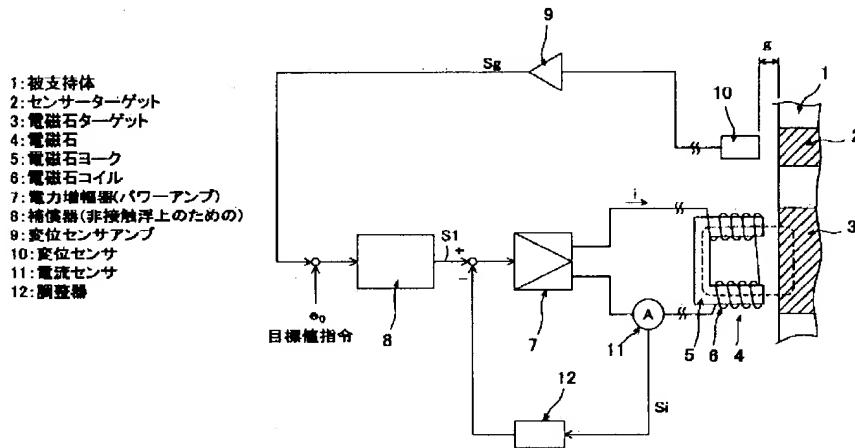
【図10】本発明に係る磁気軸受装置の構成例を示す図である。

【図11】一般的な磁気軸受を採用する装置の構成を示す図である。

### 【符号の説明】

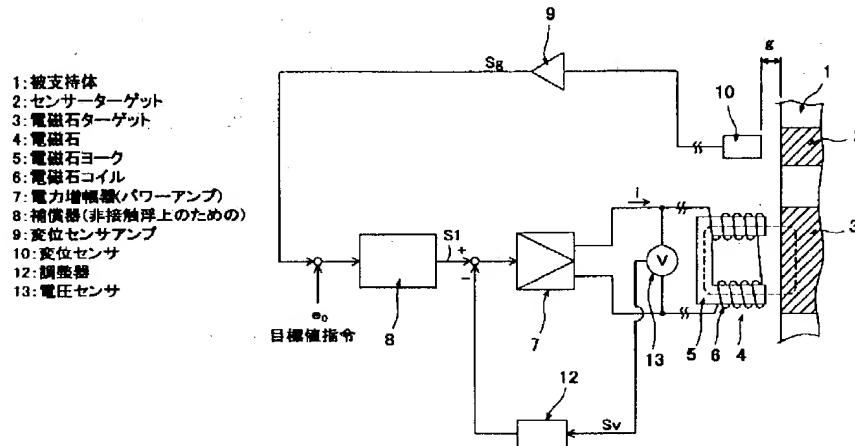
1	被支持体
2	センサターゲット
3	電磁石ターゲット
4	電磁石
5	電磁石ヨーク
6	電磁石コイル
7	パワーアンプ
8	補償器
9	変位センサアンプ
10	変位センサ
11	電流センサ
12	調整器
13	電圧センサ
14	磁束センサ
20	推定器

【図1】



従来の電流フィードバック形パワーアンプを採用した磁気軸受装置の構成例

【図2】



従来の電圧フィードバック形パワーアンプを採用した磁気軸受装置の構成例

【図7】

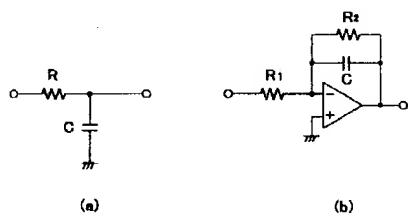
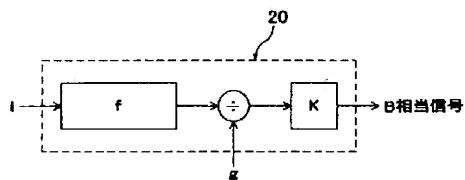


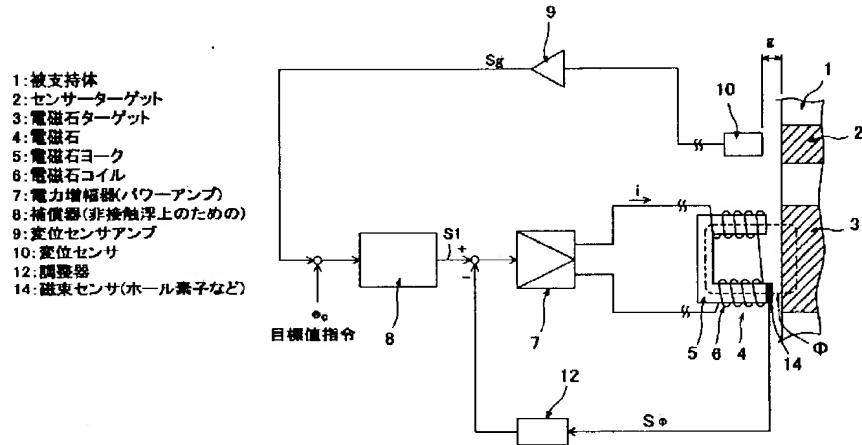
図6の遅れ特性を模擬する方法

【図8】



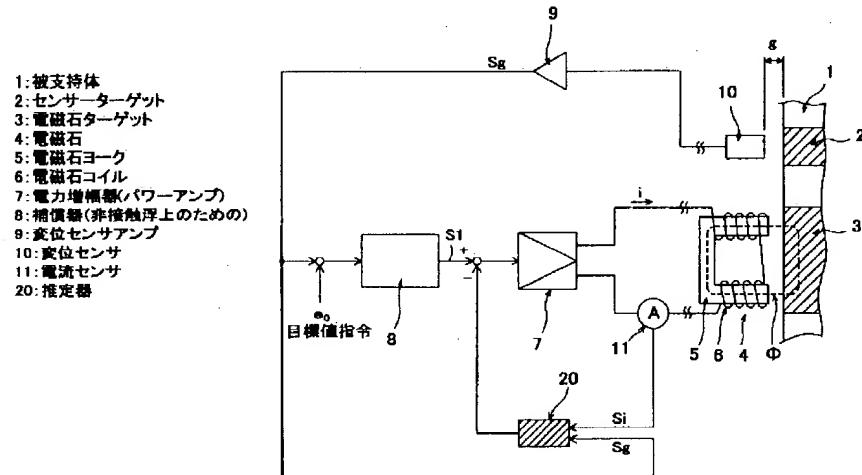
本発明に係る磁気軸受装置に用いる磁束又は磁束密度を推定する推定器の構成

【図3】



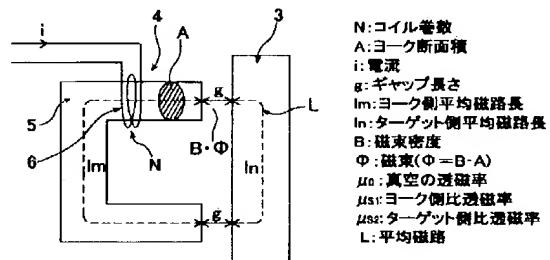
### 従来の磁束フィードバック形パワー・アンプを採用した磁気軸受装置の構成例

【図4】



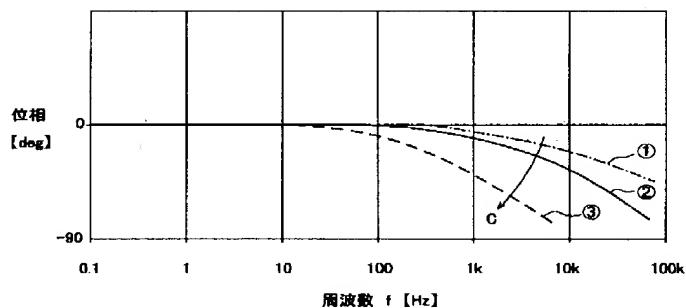
#### 本発明に係る磁気軸受装置の構成例

【図5】



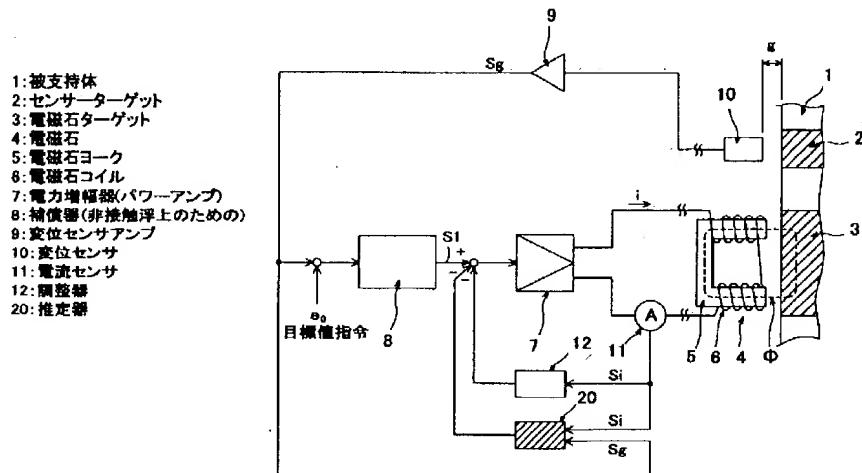
磁気回路の各パラメータと磁束密度との関係

【図6】



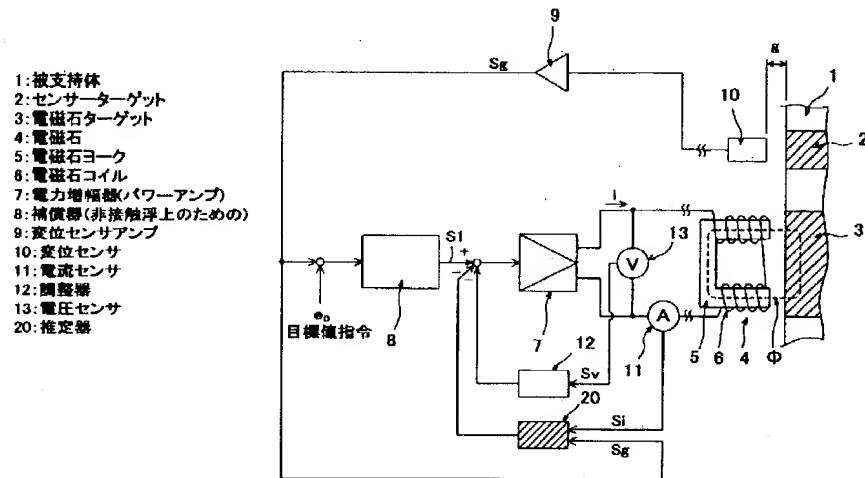
コイル電流と発生磁束又は磁束密度との一般的な伝達特性

【図9】



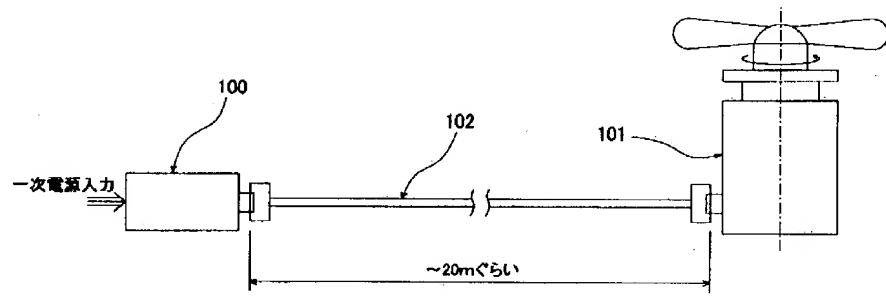
本発明に係る磁気軸受装置の構成例

【図10】



本発明に係る磁気軸受装置の構成例

【図11】



一般的な磁気軸受を採用する装置の構成